Hipotez: Eksen Parçacığı Karanlık Madde Tespiti, Manyetik Topolojik Yalıtkanlarda Anormal Hall Tepkisi Yoluyla — Sinyal-Gürültü Analizi ile

Yazar: Muzaffer Enes Yünlü

Bağlı Kurum: Bağımsız Araştırmacı

Tarih: 17 Haziran 2026

Lisans: CC BY NC SA 4.0

---

1. Özet

Eksen parçacığı karanlık maddesinin, manyetik topolojik yalıtkanlardaki (MTY) iletim elektronlarına olan kuplajı yoluyla tespit edilmesi için teorik bir çerçeve öneriyoruz. Merkezi hipotez, salınım yapan bir psödoskalar alan olarak modellenen eksen parçacığı karanlık maddesinin, $MnBi_2Te_4$'ün topolojik yüzey durumlarında rezonant spin-çevirme geçişlerini sürüklemesidir. Rezonansta — eksen parçacığı salınım frekansı, yüzey Dirac elektronlarının Zeeman yarılmasıyla eşleştiğinde — bu etkileşim, kuantum anormal Hall (KAH) kanalında ölçülebilir bir bozulma üretir. İki yanlışlanabilir deneysel imza öngörülmektedir: Dünya'nın galaktik karanlık madde rüzgarı içindeki dönüşünden kaynaklanan 23s 56d (yıldız günü) modülasyonu ve rezonant eksen parçacığı kütlesinin harici manyetik alan yoluyla sürekli ayarlanabilirliği.

Kritik bulgu: Bölüm 6'da sunulan ayrıntılı bir sinyal-gürültü analizi, DFSZ-modeli eksen parçacıklarından $m_a = 0,1$ meV'de beklenen sinyalin, son teknoloji bir milikelvin cihazının Johnson gürültü tabanının yaklaşık 55 büyüklük mertebesi altında olduğunu göstermektedir. Bu, fiziksel mekanizmayı yanlışlamaz, ancak önerilen geometrinin mevcut haliyle uygun bir dedektör olmadığını ortaya koyar. Bölüm 7, bu açığı kapatmak için gereken değişiklikleri tartışmaktadır.

---

2. Fiziksel Mekanizma

2.1 Galaktik Karanlık Madde Rüzgarı

Samanyolu karanlık madde halesi, $\rho_a \approx 0,3$ GeV/cm³ ile yerel bir eksen parçacığı enerji yoğunluğu ve Dünya'ya göre $v_{DM} \approx 220$ km/s karakteristik hızı üretir. Eğer karanlık madde QCD eksen parçacıklarından oluşuyorsa, bu hale, uzamsal olarak uyumlu, zamanla salınan klasik bir alan olarak kendini gösterir:

Alan genliği $a_0 = \sqrt{(2\rho_a)} \cdot \hbar/m_a$, yerel karanlık madde yoğunluğu tarafından sabitlenir. Uyum süresi $\tau_{coh} \sim Q_a/\omega_a \sim 10^{-6}$ s (m_a = 0,1 meV için), karanlık madde halesinin dar hız dağılımını yansıtır ($Q_a \sim 10^6$).

2.2 Eksen Parçacığı-Elektron Kuplajı

Eksen parçacığı alanı ile elektronlar arasındaki etkileşim Lagrangiyeni:

Katıhal elektronları için geçerli olan non-relativistik limitte, bu şuna indirgenir:

burada $\dot{a}(t) = m_a c^2 a_0 \sin(\omega_a t)/\hbar$, eksen parçacığı alanının zaman türevidir.

Kuplaj sabiti değerleri (literatür):

· DFSZ modeli: $g_{aee} = 1{,}50 \times 10^{-14} \cdot (m_a / \text{meV}) \cdot \sin^2\beta$

· KSVZ modeli: $g_{aee} \sim 3 \times 10^{-16}$ (döngü-bastırılmış, yaklaşık 50 kat daha küçük)

m_a = 0,1 meV (bu çalışmadaki hedef kütle) için: $g_{aee}^{DFSZ} \approx 1{,}5 \times 10^{-15}$

2.3 $MnBi_2Te_4$ Dedektör Platformu Olarak

$MnBi_2Te_4$, hem kuantum anormal Hall etkisinin (tek katmanlı) hem de eksen parçacığı yalıtkan durumunun (çift katmanlı) deneysel olarak doğrulandığı, içsel bir antiferromanyetik topolojik yalıtkandır. KAH durumundaki 7-septuple-katman (SK) cihazı şunları sağlar:

· Kuantize Hall direnci $R_H = h/e^2 \approx 25.813\ \Omega$

· $v_F \sim 3 \times 10^5$ m/s hızıyla topolojik yüzey Dirac konisi

· Değişim-kaynaklı Zeeman aralığı $\Delta_Z \sim 10–50$ meV (kapı voltajı ve B-alanı ile ayarlanabilir)

· Çalışma sıcaklığı: $T < 10$ K (KAH başlangıcı); maksimum kuantizasyon için $T \sim 50$ mK

2.4 Rezonans Koşulu

Eksen parçacığı salınım frekansı Zeeman yarılmasıyla eşleştiğinde:

eksen parçacığı rezonant spin-çevirme geçişlerini sürükler. Etkin Rabi frekansı:

Rezonansta, bir uyum penceresi τ_coh üzerindeki spin-çevirme olasılığı:

---

3. Yanlışlanabilir Deneysel Öngörüler

Öngörü 1 — Yıldız Günü Modülasyonu (23s 56d)

Dünya döndükçe, kristal ekseninin galaktik karanlık madde rüzgarı yönü üzerindeki izdüşümü sinüzoidal olarak değişir. KAH sinyal genliği, T_yıldız = 23s 56d 04s (bir yıldız günü) periyoduyla modüle olmalıdır. 24s (güneş günü) modülasyonu, karanlık madde yerine termal veya elektromanyetik bir yapay ürünü gösterir.

Öngörü 2 — Manyetik Alan Kütle Taraması

Rezonans koşulu $m_a c^2 = g \mu_B (B_{ext} + B_{değişim})$, her harici alan değerini belirli bir eksen parçacığı kütlesine eşler. $\Delta_{değişim} \sim 10$ meV ile $MnBi_2Te_4$ için:

Not: bu kütle aralığı (10 meV), teorik olarak motive edilmiş QCD eksen parçacığı kütlelerinin ağır ucundadır. Kanonik 1–100 μeV penceresine erişmek için, çok daha küçük bir Zeeman aralığına ($\Delta_Z \sim 0{,}1–10$ meV) sahip bir malzeme gerekli olacaktır.

Öngörü 3 — Tek/Çift Katman İmzası

KAH durumu (tek katmanlar) ve eksen parçacığı yalıtkan durumu (çift katmanlar), harici eksen parçacığı alanına farklı geometrik ön-faktörlerle kuplanır. N = 5, 6, 7, 8 SK katmanlı bir cihaz serisi, alternatif sinyal polaritesi göstermelidir — eksen parçacığı kuplaj gücünden bağımsız olan bir iç tutarlılık kontrolü.

---

4. Mevcut Eksen Parçacığı Deneyleriyle Karşılaştırma

Deney Mekanizma Kütle Aralığı Durum

ADMX Boşluk foton dönüşümü 2–4 μeV Aktif

CASPEr Nükleer spin presesyonu (NMR) 10^{-22}–10^{-10} eV Aktif

ABRACADABRA Toroidal manyetik akı 10^{-12}–10^{-6} eV Aktif

QUAX YIG'de magnon uyarımı ~43 μeV Aktif

Bu çalışma Topolojik spin-çevirme → KAH sinyali ~10 meV (ayarlanabilir) Hipotez

En yakın analog, manyetik bir malzemede spin-foton kuplajını da kullanan QUAX'tır (QUaerere AXions). Temel fark, mikrodalga boşluğu yerine kuantize Hall kanalının okuma olarak kullanılmasıdır.

---

5. Gürültü Tabanı Analizi

5.1 Cihaz Parametreleri (7-SK $MnBi_2Te_4$, T = 50 mK)

5.2 Sinyal Tahmini (m_a = 0,1 meV, DFSZ modeli)

5.3 Gürültü Tabanı (50 mK seyreltme buzdolabı, 1/τ_coh bant genişliği)

5.4 Sinyal-Gürültü Oranı

Sinyal, gürültü tabanının yaklaşık 55 büyüklük mertebesi altındadır.

Bu marjinal bir açık değildir. Ölçüm teknolojisindeki artımlı iyileştirmelerle tek başına kapatılamayacak temel bir boşluktur.

---

6. Dürüst Değerlendirme: Bunun Anlamı Nedir?

SGO hesaplaması fiziksel mekanizmayı geçersiz kılmaz. Eksen parçacığı-elektron kuplajı gerçektir, $MnBi_2Te_4$'deki KAH etkisi gerçektir ve rezonans koşulu fiziksel olarak iyi motive edilmiştir. Hesaplamanın gösterdiği şey:

Mevcut geometri — DC Hall taşınımıyla ölçülen tek bir mikron-ölçekli cihaz — DFSZ kuplaj gücünde beklenen eksen parçacığı sinyalini tespit edemez.

Bunun nedenleri:

1. g_{aee} son derece küçüktür ($\sim 10^{-15}$) — bu, eksen parçacığının temel bir özelliğidir

2. Eksen parçacığı uyum süresi kısadır (~6 μs), pencere başına entegrasyonu sınırlar

3. Kuantum Hall kanalı, kalite faktörü yükseltmesi olan rezonant bir boşluk değil, iki uçlu bir sinyaldir

---

7. İyileştirilmiş Duyarlılığa Giden Yollar

Bu konseptin uygulanabilir bir dedektör haline gelmesi için üç şey gereklidir:

Yol 1 — Rezonant yükseltme:

DC Hall okumasını, spin sistemine kuplajlı rezonant bir mikrodalga boşluğu ile değiştirin. Bu, QUAX tarafından izlenen yaklaşımdır ve SGO'yu $Q_{boşluk} \sim 10^4$–10^5 faktörü kadar artırır.

Yol 2 — Çok-spinli topluluk:

Tek bir cihazda 10^6 yüzey spini yerine, 10^8–10^{10} spin bölgesinden oluşan bir dizi kullanın (ör. toplu $MnBi_2Te_4$ kristali veya geniş alan epitaksiyel film). Bu, sinyali N ile doğrusal olarak ölçeklendirir.

Yol 3 — Daha yüksek eksen parçacığı kütle hedefi:

Bu platformun erişilebilir kütle penceresi ($\Delta_Z \sim 10$ meV), rezonansı $m_a \sim 10$ meV'ye — kanonik QCD eksen parçacıklarından çok daha ağır — yerleştirir. $\Delta_Z \sim 10$–100 μeV (ADMX/CASPEr hedefleriyle eşleşen) bir platform mühendisliği, çok küçük manyetik aralıklara sahip malzemeler gerektirir; bu, yakınlık-etkisi heteroyapılarında elde edilebilir olabilir.

---

8. Sonuç

$MnBi_2Te_4$'deki topolojik yüzey durumlarının bir eksen parçacığı dedektörü olarak kullanılması önerisi fiziksel olarak iyi motive edilmiş ve kavramsal olarak yenidir. Yıldız modülasyonu testi ve manyetik alan kütle taraması gerçek deneysel imzalardır. Bununla birlikte, burada sunulan sinyal-gürültü analizi, minimum cihaz geometrisinin mevcut gürültü tabanının yaklaşık 55 büyüklük mertebesi altında bir sinyal ürettiğini ortaya koymaktadır.

Bu makalenin katkısı, bu açığı net bir şekilde ölçmek, kapatmak için gereken üç yolu belirlemek ve topolojik spin sistemleri için rezonant yükseltme mekanizmaları üzerine daha fazla teorik çalışmayı teşvik etmektir.

---

9. Referanslar

1. Peccei, R. D., & Quinn, H. R. (1977). CP conservation in the presence of pseudoparticles. Physical Review Letters, 38(25), 1440.
2. Weinberg, S. (1978). A new light boson? Physical Review Letters, 40(4), 223.
3. Deng, Y., ve diğerleri. (2020). Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator $MnBi_2Te_4$. Science, 367, 895–900.
4. Chong, S. K., ve diğerleri. (2025). Antiferromagnetic quantum anomalous Hall effect under spin flips and flops. Nature.
5. Li, S., ve diğerleri. (2024). Progress on the antiferromagnetic topological insulator $MnBi_2Te_4$. National Science Review, 11(2), nwac296.
6. Bai, Y., ve diğerleri. (2024). Quantized anomalous Hall resistivity achieved in MBE-grown $MnBi_2Te_4$ thin films. National Science Review, 11(2), nwad189.
7. Raffelt, G., & Weiss, A. (2024). Astrophysical axion bounds: The 2024 edition. arXiv:2401.13728.
8. Graham, P. W., & Rajendran, S. (2013). New observables for direct detection of axion dark matter. Physical Review D, 88, 035023.
9. Barbieri, R., ve diğerleri. (2017). Searching for galactic axions through magnetized media: The QUAX proposal. Physical Review D, 96, 043537.